II. Pole elektryczne

Natężenie pola

Oddziaływanie pomiędzy ładunkami opisać można na dwa sposoby:

1) Biorąc pod uwagę bezpośrednio oddziaływanie **ładunek – ładunek**, przy czym siła oddziaływania wyrażona jest prawem Coulomba (Równ. 1):

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}$$

2) Używając koncepcji pola elektrycznego, które definiujemy w ten sposób, że każdemu punktowi przestrzeni **r** przypisujemy wektor natężenia pola elektrycznego **E**(**r**). Pole elektryczne oddziałuje na dowolny ładunek doń wprowadzony. W efekcie, oddziaływanie między ładunkami opisujemy zgodnie ze schematem: **ładunek – pole – ładunek**. Natężenie pola elektrycznego **E** definiujemy jako siłę wywieraną przez pole elektryczne na jednostkowy dodatni ładunek próbny (q_0). Natomiast siła działająca w polu elektrycznym na dowolny ładunek q wynosi:

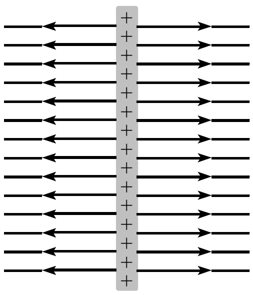
$$\boxed{\mathbf{F} = q\mathbf{E} \qquad (2)}$$

Linie sił

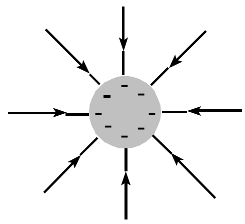
W celu wizualizacji rozkładu pola elektrycznego używa się linii sił pola. Linie sił pola rysowane są zgodnie z dwoma zasadami:

a) w dowolnym punkcie linia sił jest styczna do wektora natężenia pola elektrycznego **E**,

b) linie sił wykreśla się tak, aby liczba linii na jednostkę powierzchni przekroju poprzecznego była proporcjonalna do wartości pola E (czyli gdy linie są narysowane gęsto - E jest duże). Na poniższym rysunku pokazano przykładowe rozkłady pola elektrycznego, przy użyciu linii sił pola.

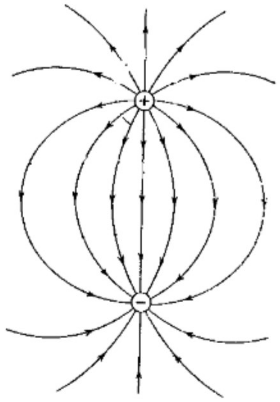


Rys.1. Jednorodne pole elektryczne, wytworzone przez nieskończoną płaszczyznę, naładowaną ze stałą gęstością ładunku.



Rys.2. Centralne pole elektryczne wytworzone przez jednorodnie naładowaną kulę.

Rys.1 przedstawia pole jednorodne, czyli takie, że wartość E w każdym punkcie jest stała. Natomiast Rys.2 przedstawia pole pochodzące od jednorodnie naładowanej kuli (w granicznym przypadku od ładunku punktowego); wraz z oddalaniem się od ładunku wartość E maleje. Natomiast poniższy rysunek przedstawia linie sił pola elektrycznego wytworzonego przez dwa jednakowe ładunki o przeciwnych znakach (dipol).

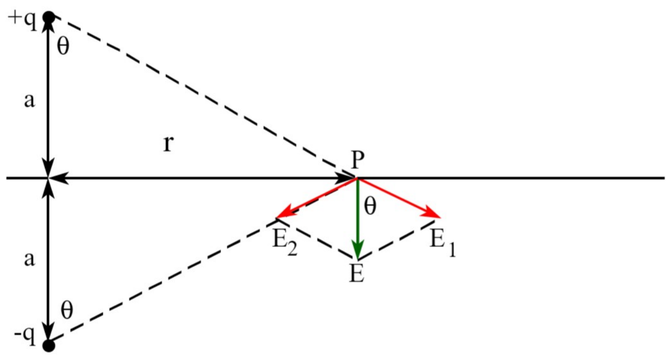


Rys.3. Linie sił pola elektrostatycznego wytworzonego przez dwa jednakowe ładunki o przeciwnych znakach (dipol).

Jeśli chcemy wyliczyć natężenie pola **E**, pochodzące od układu ładunków tym celu należy:
a) wyliczyć $\mathbf{E_i}$ w danym punkcie pochodzące od ładunku numer „i” (tak jakby to był jedyny obecny ładunek),
b) dodać wektorowo znalezione natężenia, pochodzące od wszystkich ładunków.
Inaczej mówiąc, stosujemy tu zasadę superpozycji.

$$\mathbf{E} = \sum_{i=1}^{n} \mathbf{E_i} \qquad (3)$$

Przykład 1: Pole elektryczne, pochodzące od dipola elektrycznego.



Chcemy wyliczyć natężenie pola **E** na osi symetrii dipola, np. w punkcie P. Wypadkowe pole **E** jest superpozycją natężeń $\mathbf{E_1}$ i $\mathbf{E_2}$, pochodzących od każdego z dwóch ładunków:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E_1} + \mathbf{E_1}$$

Zgodnie z prawem Coulomba:

$$E_1 = E_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{a^2 + r^2},$$

natomiast natężenie pola wypadkowego: $E = 2E_1 \cos\theta$ gdzie: $\cos\theta = \frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}}$.

Ostatecznie:

$$E=\frac{2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{(a^2+r^2)}\frac{a}{\sqrt{a^2+r^2}}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2aq}{(a^2+r^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Zauważmy, że jeśli r>>a (czyli znajdujemy się znacznie dalej od dipola, niż wynosi jego rozmiar), to szukane natężenie wynosi:

$$E\cong\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2aq}{r^3}$$

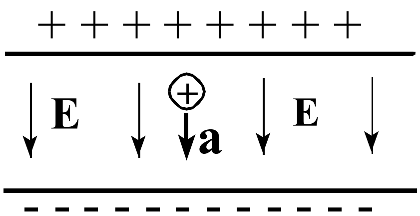
Definiując elektryczny moment dipolowy: p=2aq, możemy powyższy wynik zapisać:

$$\boxed{E\cong\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{p}{r^3}} \qquad (4)$$

Nadmieńmy, że wygodnie jest przedstawiać moment dipolowy jako wektor **p** skierowany od ładunku ujemnego do dodatniego, o długości p=2aq.

Przykład 2: Ładunek w polu elektrycznym

Załóżmy, że cząstka o ładunku q i masie m znajduje się w obszarze jednorodnego pola elektrycznego (np. pomiędzy okładkami kondensatora). Na naładowaną cząstkę działa siła: $\mathbf{F}=\mathbf{E}q$, która powoduje przyspieszenie: $\mathbf{a}=\frac{\mathbf{E}q}{m}$



Rys.4 Jednorodne pole między okładkami kondensatora

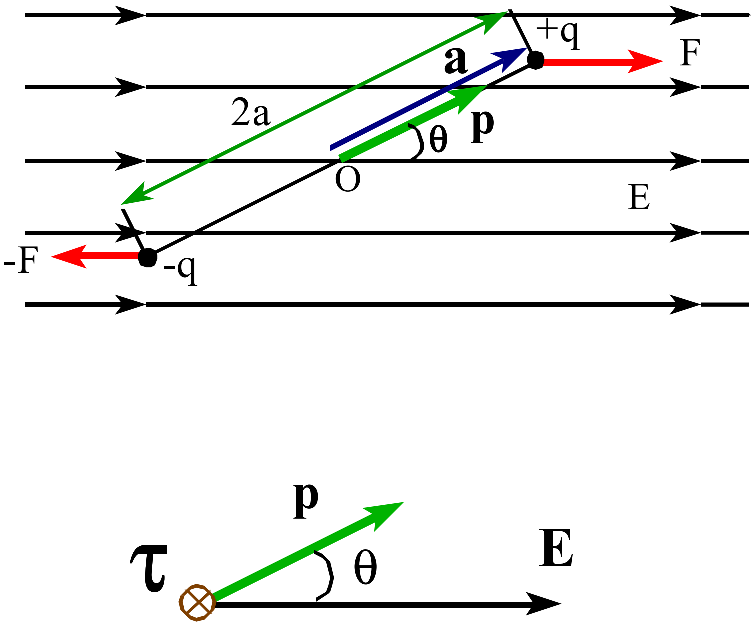
Jeśli cząstka na początku była nieruchoma, to uzyskana przez nią energia kinetyczna po przebyciu drogi *y* wynosi (stosujemy zasadę zachowania energii):

$E_k=Fy=qEy$ lub równoważnie: $\frac{1}{2}mv^2=qEy$. A zatem prędkość cząstki, uzyskana po przebyciu w polu elektrycznym drogi y wynosi:

$$v=\sqrt{\frac{2qEy}{m}}$$

Przykład 3. Dipol w polu elektrycznym

Wyliczmy moment sił działających na dipol elektryczny w polu elektrycznym (Rys. 5).



Rys. 5. Dipol w jednorodnym polu elektrycznym

Wypadkowa siła działająca na dipol jest równa zero. Natomiast istnieje niezerowy moment obracający dipol wokół osi prostopadłej zarówno do wektora **E** jak i **p**, czyli do płaszczyzny powyższego rysunku. Wspomniany moment sił wynosi: $\tau = 2Fa\sin\theta$ czyli

$$\tau = 2aqE\sin\theta = pE\sin\theta$$

Wynik ten możemy zapisać ogólniej:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{p} \times \mathbf{E} \qquad (5)$$

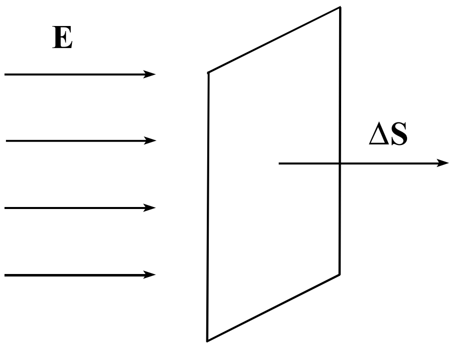
pamiętając, że wektor momentu dipolowego wnosi: **p**=2q**a**.

III. Prawo Gaussa

Zdefiniujmy strumień pola elektrycznego **E**, przechodzącego przez pomyślaną płaską powierzchnię Δ**S** (wektor Δ**S** jest prostopadły do powierzchni, zaś jego długość równa jest polu tej powierzchni), jako:

$$\Delta\Phi = \mathbf{E} \bullet \Delta\mathbf{S} \qquad (6)$$

Jest on równy iloczynowi skalarnemu natężenia pola i wektora Δ**S**.



Rys. 6. Strumień pola elektrycznego **E**, przechodzący przez powierzchnię Δ**S**.